

УДК 621.923.42

В.І. КАЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук,
В.В. КАЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук,
Я.В. КУЖЕЛЬНИЙ,
Д.В. КАЛЬЧЕНКО, Чернігів, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ СУМАРНОЇ СИЛИ РІЗАННЯ ОДИНИЧНИМ АБРАЗИВНИМ ЗЕРНОМ ПРИ ШЛІФУВАННІ ЗІ СХРЕЩЕНИМИ ОСЯМИ КРУГА ТА ДЕТАЛІ

Наведено 3D модель процесу різання пластичного матеріалу одиничним абразивним зерном, спосіб визначення профілю деталі. Була зображена 3D модель абразивного зерна та відповідні точки, в яких визначались сили різання. Визначено сумарну силу різання у відповідному перерізі абразивного зерна. Наведено метод створення різноманітних форм абразивного зерна, використовуючи безперервність твірної, що досягається використанням функції Хевісайда.

Ключові слова: різання пластичного матеріалу, сили різання

Приведена 3D модель процесса резания пластического материала единичным абразивным зерном, способ определения профиля детали. Была изображена 3D модель абразивного зерна и соответствующие точки, в которых определялись силы резания. Определено суммарную силу резания в соответствующем сечении абразивного зерна. Приведен метод создания различных форм абразивного зерна, используя непрерывность образующей, что достигается использованием функции Хевисайда.

Ключевые слова: резание пластического материала, силы резания

Given a 3D model of the cutting process the plastic material by a single abrasive grain, the method of determining the profile of the part. Was depicted the 3D model of the abrasive grain and the corresponding points, in which were determined cutting forces. Determined the total cutting force in the relevant section of the abrasive grain. Given the method of creating different shapes of abrasive grain by using the continuity of the generator, which is achieved by the use of Heavyside function.

Keywords: cutting process the plastic material, cutting force

1. Постановка проблеми. Процес різання абразивними зернами деталі під час шліфування, являє собою складний термомеханічний процес. Дослідження даного процесу дає можливість підвищити точність, якість поверхневого шару деталі та продуктивність процесу шліфування.

Складність дослідження даного процесу полягає у тому, що не всі кромки абразивних зерен будуть знімати припуск. При цьому, певна частина роботи даних кромки буде витрачатись на деформування деталі та тертя в зоні контакту, а інша, безпосередньо, на процес різання.

Використання 3D моделі процесу різання одиничним абразивним зерном дає можливість дослідити вплив форми абразивного зерна, процеси, що відбуваються під час шліфування та визначити сумарну силу різання у відповідних точках даної моделі.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі Філімонова Л.Н. [16] були досліджені процеси, які відбуваються під час шліфування одиничним абразивним зерном, проте не було дослідження впливу ріжучих кромок, які деформують деталь. У роботі [9] зображено методику визначення складових сил різання під час шліфування зі схрещеними осями інструменту та деталі. Проте не було враховано впливу процесу пружної деформації деталі та форми абразивного зерна під час шліфування. У роботі [5] розроблено математичну модель способу глибинного однопрохідного шліфування зі схрещеними осями деталі та круга. Проте не було розглянуто впливу деформуючих та ріжучих кромок під час шліфування. У роботі [12] були описані основи моделювання процесу різання методом скінчених елементів. Проте не наведено рекомендацій щодо створення 3D моделі процесу різання одиничним абразивним зерном.

3. Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Відсутність визначення сумарної сили різання одиничним абразивним зерном, використовуючи 3D модель процесу шліфування.

4. Мета статті. Метою даної роботи є визначення сумарної сили різання одиничним абразивним зерном під час шліфування та дослідження можливості створення різноманітних геометричних форм абразивного зерна. Це дасть можливість визначити сумарну силу різання із врахуванням ріжучих та деформуючих кромок.

5. Викладення основного матеріалу. Найбільший вплив на якість і точність поверхневого шару деталі мають фінішні операції обробки. Найбільш поширеною із таких операцій є шліфування. Велика кількість робіт [1-4, 6-8, 10, 11, 13-15] була присвячена вивченню даного процесу.

Під час шліфування процес зняття припуску буде відбуватися тільки тими абразивними зернами, що знаходяться над зв'язкою. Проте процес різання буде відбуватися лише тими зернами, які мають відповідну геометричну форму.

Існують різноманітні можливі форми абразивних зерен: конус, еліпс, тетраїд, циліндр, призма, піраміда та інші.

Для визначення профілю деталі [14], розглянемо шліфування круглого циліндра циліндричним кругом (рис. 1).

Проведемо переріз, який буде перпендикулярний до осей круга та деталі. Відносний рух круга і заготовки зводиться до його обертання навколо осі деталі.

Тому в будь-якій точці M профілю круга, швидкість відносного руху \vec{v} буде перпендикулярною до прямої O_1M , що з'єднує вісь деталі з досліджуваною точкою. Нормаль \vec{N} до профілю круга буде проходити по

радіусу, що з'єднує центр круга O_2 з точкою M . В довільній точці M профілю круга, нормаль \bar{N} не перпендикулярна швидкості \bar{v} .

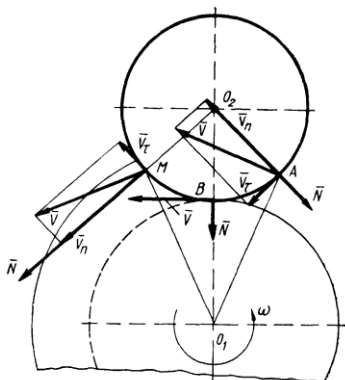


Рисунок 1 – Схема шліфування круглого циліндра циліндричним кругом

Розкладемо швидкість \bar{v} на складові в напрямку нормалі та дотичній до профілю круга:

$$\bar{v} = \bar{v}_n + \bar{v}_\tau \quad (1)$$

В результаті руху зі швидкість \bar{v}_n , точка M профілю круга буде врізатися у заготовку. В точці A профілю круга, нормаль \bar{N} не буде перпендикулярною до \bar{v} .

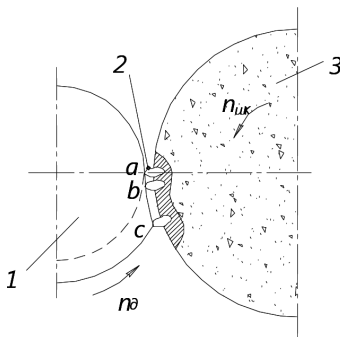
В точці B профілю круга, нормаль \bar{N} буде перпендикулярна до швидкості \bar{v} відносно руху. Також дана точка буде точкою контакту профілю круга і профілю поверхні деталі.

Умова контакту профілів круга та деталі, тобто умова перпендикулярності векторів \bar{N} і \bar{v} :

$$\bar{N} \cdot \bar{v} = 0 \quad (2)$$

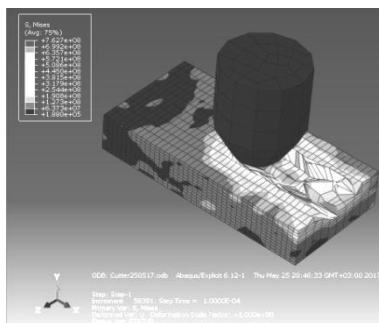
Ця умова дає можливість визначити точки контакту з'єднувальних профілів в будь-який момент часу. Сукупність точок контакту в системі координат, яка пов'язана із заготовкою, буде профілем деталі.

Згідно з [9], схема обробки деталі (1) одиничним абразивним зерном (2) шліфувального круга (3) зображено на рис. 2.



У роботі [8] було створено 3D модель процесу різання одиничним абразивним зерном (рис. 3). В якості матеріалу деталі була вибрана Сталь 45, а матеріалом абразивного інструменту – Електрокорунд білий.

Вхідні данні були прийняті наступні: передній кут ріжучої кромки зерна $\gamma = -45^\circ$, радіус заокруглення вершини ріжучої кромки $\rho = 40$ мкм, глибина врізання $a_z = 10$ мкм.



У роботі Філімонова Л.Н [16] наведено зображення ризи, яка утворена мікрорізнанням заготовки зі сталі Р18 (рис. 4).

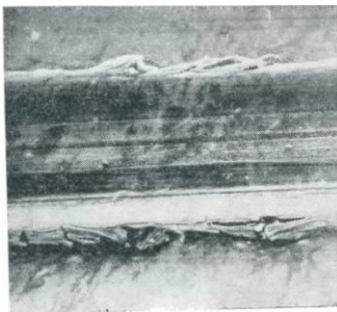


Рисунок 4 – Ділянка риски, утворена мікрорізнанням заготовки із сталі Р18

На рис. 5 та 6 зображено абразивне зерно і відповідні точки, в яких визначались сили різання.

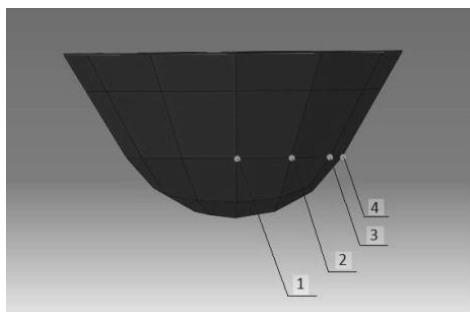


Рисунок 5 – Схема абразивного зерна
1-4 – відповідні точки, в яких визначались сили різання

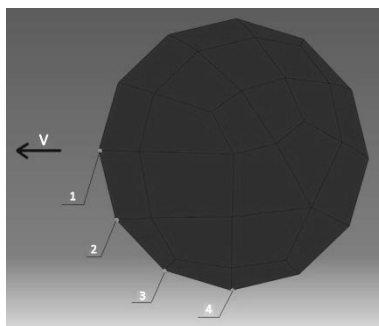


Рисунок 6 – Переріз абразивного зерна, в якому визначались сили різання
 V – напрямок руху зерна

Використовуючи програмне забезпечення ABAQUS, було визначено силу різання у відповідних точках та їх сумарну силу різання.

Для точки 1 абразивного зерна, величина сили різання зображена на рис. 7.

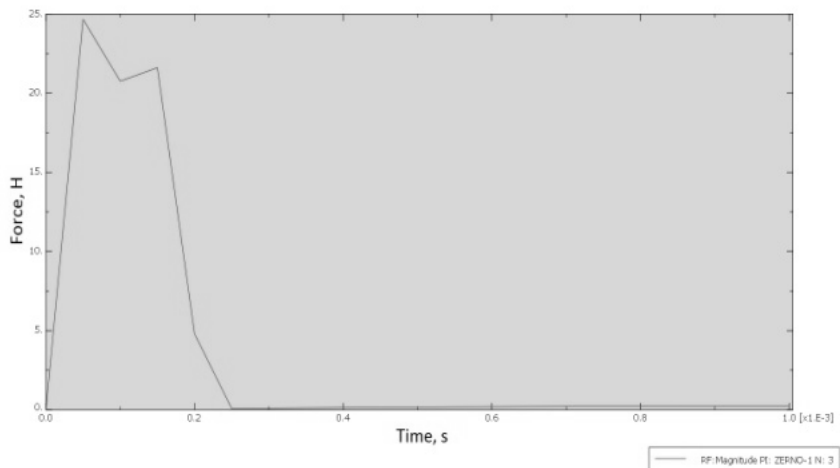


Рисунок 7 – Залежність часу від сили різання абразивного зерна в точці 1

Для точки 2 абразивного зерна, величина сили різання зображена на рис. 8.

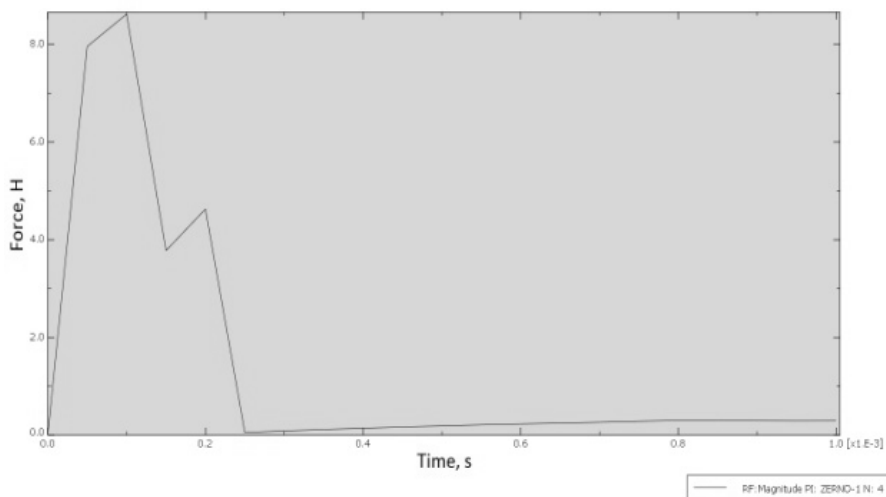


Рисунок 8 – Залежність часу від сили різання абразивного зерна в точці 2

Для точки 3 абразивного зерна, величина сили різання зображена на рис. 9.

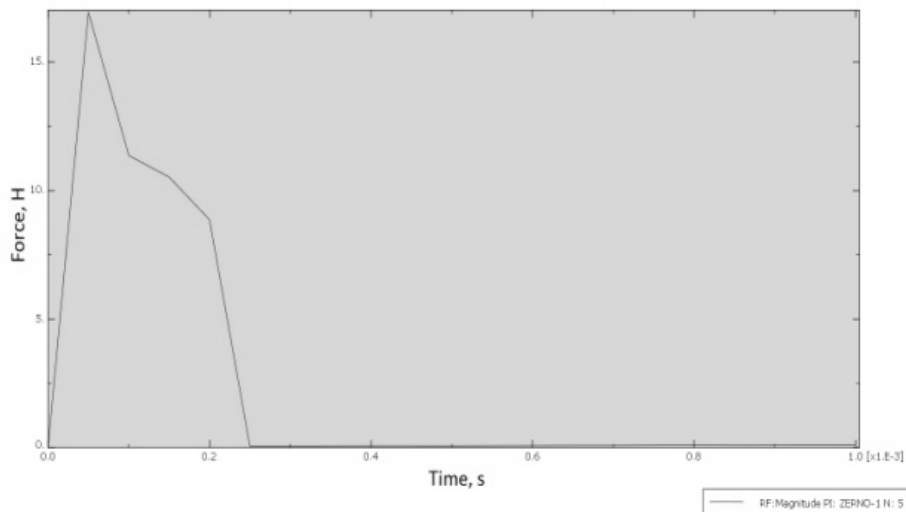


Рисунок 9 – Залежність часу від сили різання абразивного зерна в точці 3

Для точки 4 абразивного зерна, величина сили різання зображена на рис. 10.

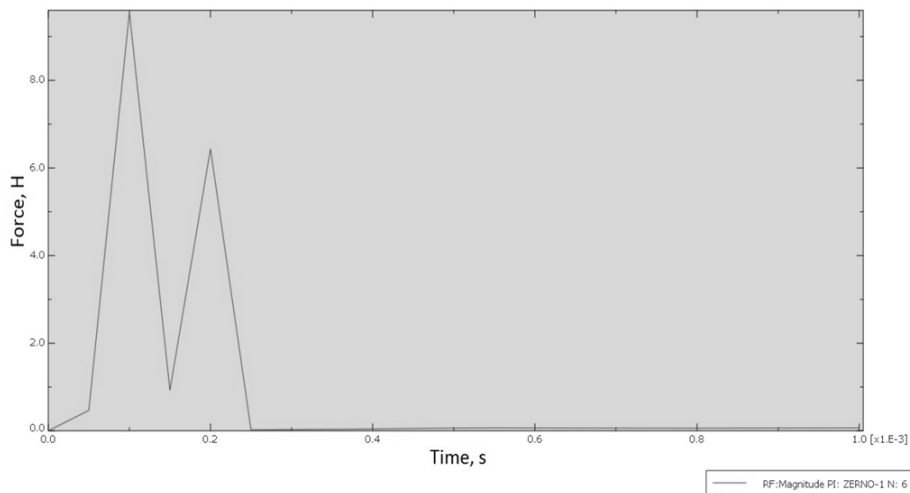


Рисунок 10 – Залежність часу від сили різання абразивного зерна в точці 4

Величина сумарної сили різання у відповідних точках абразивного зерна, зображена на рис. 11.

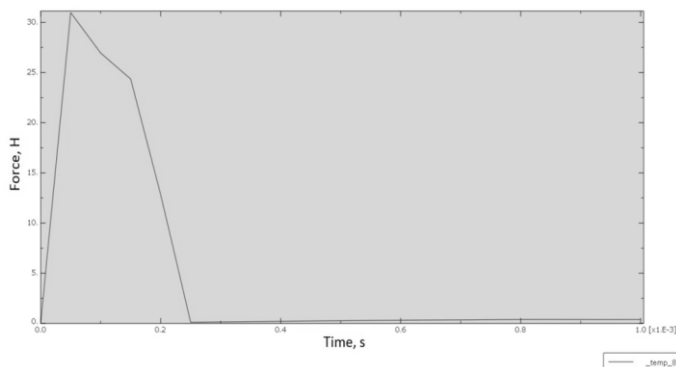


Рисунок 11 – Залежність часу від сумарної сили різання у відповідних точках абразивного зерна

Для даного прикладу форма перерізу абразивного зерна буде мати вигляд кола, таку ж форму буде мати і еліпсоїд обертання. Для абразивного зерна у вигляді тетраїда, форма буде визначатися за допомогою безперервної твірної функції Хевісайда в програмному забезпеченні Mathcad (рис. 12 та 13).

$$\begin{aligned}
 \phi_1 &:= \frac{\pi}{2} + 34.0224 \cdot \text{deg} & \phi_2 &:= \phi_1 + 33.1903 \cdot \text{deg} & \phi_3 &:= \phi_2 + 53.4513 \cdot \text{deg} & \phi_4 &:= \phi_3 + 2.59.336 \cdot \text{deg} \\
 L1 &:= 102.5121 & \varepsilon 1 &:= 112.7872 \cdot \text{deg} & \phi_5 &:= \phi_4 + 53.4513 \cdot \text{deg} & \phi_6 &:= \phi_5 + 33.1903 \cdot \text{deg} \\
 \phi &:= \phi_1, (\phi_1 + 0.001 \cdot \text{deg}) .. \phi_2 \\
 rz1(\phi) &:= \frac{L1 \cdot \sin(\varepsilon 1)}{\sin(\pi - \varepsilon 1 - \phi_2 + \phi)} \\
 \phi &:= \phi_2, \phi_2 + 0.001 \cdot \text{deg} .. \phi_3 & \varepsilon 2 &:= 104.336 \cdot \text{deg} & L2 &:= 40 \\
 rz2(\phi) &:= \frac{L2 \cdot \sin(\varepsilon 2)}{\sin(\pi - \varepsilon 2 - \phi_3 + \phi)} \\
 \phi &:= \phi_3, \phi_3 + 0.001 \cdot \text{deg} .. \phi_4 \\
 rz3(\phi) &:= 40 \\
 \phi &:= \phi_4, \phi_4 + 0.001 \cdot \text{deg} .. \phi_5 & \varepsilon 4 &:= 104.336 \cdot \text{deg} & L4 &:= 40 \\
 rz4(\phi) &:= \frac{L2 \cdot \sin(\varepsilon 2)}{\sin(\pi - \varepsilon 2 + \phi_4 - \phi)} & L5 &:= 102.5121 \\
 \phi &:= \phi_5, \phi_5 + 0.001 \cdot \text{deg} .. \phi_6 & \varepsilon 5 &:= 112.7872 \cdot \text{deg} \\
 rz5(\phi) &:= \frac{L5 \cdot \sin(\varepsilon 1)}{\sin(\pi - \varepsilon 1 + \phi_5 - \phi)}
 \end{aligned}$$

Рисунок 12 – Вхідні данні та методика розрахунку в середовищі Mathcad

$$\phi_0 := \frac{\pi}{2} + 34.0224 \cdot \text{deg}$$

$$\phi_1 := \phi_0 + 33.1903 \cdot \text{deg}$$

$$\phi_2 := \phi_1 + 53.4513 \cdot \text{deg}$$

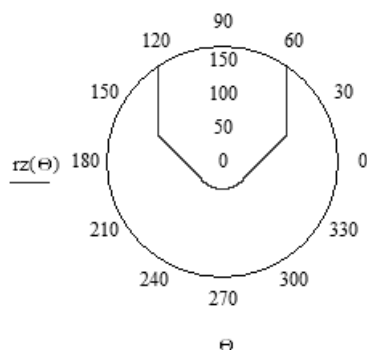
$$\phi_3 := \phi_2 + 2 \cdot 59.336 \cdot \text{deg}$$

$$\phi_4 := \phi_3 + 53.4513 \cdot \text{deg}$$

$$\phi_5 := \phi_4 + 33.1903 \cdot \text{deg}$$

$$\begin{aligned} rz(\Theta) := & rz1(\Theta) \cdot (1 - \Phi(\Theta - \phi_1)) + rz2(\Theta) \cdot (\Phi(\Theta - \phi_1) - \Phi(\Theta - \phi_2)) \dots \\ & + rz3(\Theta) \cdot (\Phi(\Theta - \phi_2) - \Phi(\Theta - \phi_3)) + rz4(\Theta) \cdot (\Phi(\Theta - \phi_3) - \Phi(\Theta - \phi_4)) \dots \\ & + rz5(\Theta) \cdot \Phi(\Theta - \phi_4) \end{aligned}$$

$$\Theta := \phi_0, \phi_0 + 0.001 \cdot \text{deg} \dots \phi_5$$



$$\text{Cylindr}(\Theta, z) := M3(z) \cdot M6(\Theta) \cdot M1(rz(\Theta)) \cdot e4$$

$$\text{Cylind}(\Theta, z) := \text{submatrix}(\text{Cylindr}(\Theta, z), 1, 3, 1, 1)$$

$$\text{Zagotovka} := \text{CreateMesh}(\text{Cylind}, 0, 2 \cdot \pi - 0.0001 \cdot \text{deg}, -20, 10, 20, 20)$$

Рисунок 13 – Результати розрахунку в середовищі Mathcad

Форма абразивного зерна (рис. 14) залежить від радіусу заокруглення кромки ρ , що в свою чергу є функцією від кута φ :

$$\rho = f(\varphi) \quad (3)$$

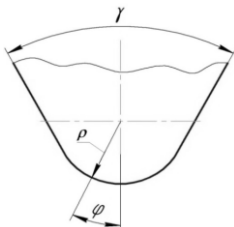


Рисунок 14 – Схема форми абразивного зерна
 γ – кут при вершині; ρ – радіус заокруглення ріжучої кромки;
 φ – кут, від якого залежить форма абразивного зерна

6. Висновки та перспективи розвитку. Вперше, використовуючи 3D модель, було визначено сумарну силу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування. Дана 3D модель може бути використана для дослідження процесу різання деталей, що мають різноманітну поверхню. Також розглянуто спосіб створення форми абразивного зерна, використовуючи безперервність твірної, що досягається використанням функції Хевісайда. У майбутньому планується дослідження теплонапруженості наведеної 3D моделі процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування.

Список використаних джерел: 1. Бабенко Е.А. 3D моделирование процесса алмазного шлифования методом конечных элементов / Е.А. Бабенко, В.А. Федорович. // Международный научно-технический сборник "Резание и инструмент в технологических системах". – 2010. – №78. – С. 16-23. 2. Грабченко А. И. Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали: монография / А. И. Грабченко, В. И. Кальченко, В. В. Кальченко. – Чернигов: ЧДТУ, 2009. – 256 с. 3. Грабченко А. И. 3D-моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: учебное пособие / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович. – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с. 4. Кальченко В.І. Аналіз методів дослідження теплонапруженості під час процесу шліфування / В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, Я. В. Кузьмський // Технічні науки та технології. – 2016. – №3 (5). – С. 43–50. 5. Кальченко В. І. Глибинне кругле шліфування зі скрещеними осями деталі і круга / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, М.А. Дмитренко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2008. – № 37. – С. 64–72. 6. Кальченко В.І. Дослідження способу шліфування валків стрічкопрокатних станів зі скрещеними осями інструмента та деталі / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко і ін. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2016. – 4. – С. 80–87. 7. Kalchenko V. Determination of cutting forces in grinding with crossed axes of tool and workpiece / Volodymyr Kalchenko, Andriy Yeroshenko et al. // Acta mechanica et automatica. – 2017. – №1 (11). – Р. 58–63. 8. Кальченко В.І. Моделювання процесу різання одиничним абразивним зерном при круглому глибинному шліфуванні / В.І. Кальченко, О.Л. Деркач, Я.В. Кузьмський // Технічні науки та технології. – 2017. – №2 (8). – С. 29-39. 9. Кальченко В.И. Определение составляющих силы резания при глубинном шлифовании поверхностей вращения ориентированным эльборовым кругом / В. И. Кальченко, Н. Н. Погиба, Д. В. Кальченко // Сверхтвердые материалы. – К.: Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2012. – № 2 (196). – С. 58-73. 10. Кальченко В.І. Теоретичне та

експериментальне дослідження процесу зняття припуску, зносу круга, точності формоутворення та теплонпруженості під час шліфування циліндричних та ступінчатих валів зі схрещеними осями деталі та круга / *В.І. Кальченко, В.В. Кальченко і ін.* // Технічні науки та технології. – 2016. – 4(6). – С. 35–43. **11.** *Клименко В.Г.* Теоретичні дослідження площі контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя / *В.Г. Клименко, І.М. Пижов* // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 1(26). – С. 69–80. **12.** *Криворучко Д. В.* Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы (Монография) / *Д. В. Криворучко, В. А. Залого* – Сумы: Университетская книга, 2012. – 496с. **13.** *Kundrák J.* Diamond grinding wheels production study with the use of the finite element method / *J. Kundrák, V. Fedorovich et al.* // Journal of Advanced Research. – 2016. – №6 (7). – P. 1057–1064. **14.** *Родін П.Р.* Основы формообразования поверхностей резанием / *П.Р. Родін* – К: «Вища школа», 1977. – 192 с. **15.** *Федоренко, Д.В.* Методология 3D моделирования процессов обработки труднообрабатываемых материалов / *Д.В. Федоренко, В.А. Федорович и др.* // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2016. – №11. – С. 208–232. **16.** *Филимонов Л.Н.* Высокоскоростное шлифование / *Л.Н. Филимонов* – Л.: Машиностроение, 1979, 248 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *Babenko E.A.* 3D modelirovanie protcessa almaznogo shlifovaniia metodom konechnykh elementov / *E.A. Babenko, V.A. Fedorovich.* // Mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskii sbornik "Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh". – 2010. – №78. – S. 16-23. **2.** *Grabchenko A. I.* Shlifovanie so skreshchiavaiushchimisia osiami instrumenta i detalii: monografiia / *A. I. Grabchenko, V. I. Kalchenko, V. V. Kalchenko.* – Chernigov : ChDTU, 2009. – 256 s. **3.** *Grabchenko A. I.* 3D-modelirovanie almazno-abrazivnykh instrumentov i protsessov shlifovaniia : uchebnoe posobie / *A. I. Grabchenko, V. L. Dobroskok, V. A. Fedorovich.* – Kh.: NTU «KhPI», 2006. – 364 s. **4.** *Kalchenko V.I.* Analiz metodiv doslidzhennia teplonapruzhnosti pid chas protsesu shlifuvannia / *V. I. Kalchenko, V. V. Kalchenko, Ya. V. Kuzhelnyi* // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. – 2016. – №3 (5). – S. 43–50. **5.** *Kalchenko V. I.* Hlybynne kruhle shlifuvannia zi skhreshchenymy osiamy detalii i kruha / *V. I. Kalchenko, V. V. Kalchenko, M. A. Dmytrenko* // Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. – 2008. – № 37. – S. 64–72. **6.** *Kalchenko V.I.* Doslidzhennia sposobu shlifuvannia valkiv strichkopratnykh staniv zi skhreshchenymy osiamy instrumenta ta detalii / *V.I. Kalchenko, V.V. Kalchenko* i in. // Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seria: Tekhnichni nauky. – 2016. – 4. – S. 80–87. **7.** *Kalchenko V.* Determination of cutting forces in grinding with crossed axes of tool and workpiece / *Volodymyr Kalchenko, Andriy Yeroshenko et al.* // Acta mechanica et automatica. – 2017. – №1 (11). – P. 58–63. **8.** *Kalchenko V.I.* Modeliuvannia protsesu rizannia odynynchym abrazyvnyym zemom pry kruhlomu hlybynnomu shlifuvanni / *V.I. Kalchenko, O.L. Derkach, Ya.V. Kuzhelnyi* // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. – 2017. – №2 (8). – S. 29–39. **9.** *Kalchenko V. I.* Opredelenie sostavliaiushchikh sily rezaniia pri glubinnom shlifovanii poverkhnosti vrashcheniia oriietirovannym elborovym krugom / *V. I. Kalchenko, N. N. Pogiba, D. V. Kalchenko* // Sverkhтвердые материалы. – К.: Institut sverkhтвердых материалов им. В. Н. Бакуля NAN Ukrainy, 2012. – № 2 (196). – S. 58–73. **10.** *Kalchenko V.I.* Teoretychne ta eksperymentalne doslidzhennia protsesu zniattia pryprysku, znosu kruha, tochnosti formoutvorennia ta teplonapruzhnosti pid chas shlifuvannia tsylindrychnykh ta stupinchatykh valiv zi skhreshchenymy osiamy detalii ta kruha / *V.I. Kalchenko, V.V. Kalchenko* i in. // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. – 2016. – 4(6). – S. 35–43. **11.** *Klymenko V.H.* Teoretychni doslidzhennia ploshchi kontaktu rizalnoi poverkhnii kruhu z detaliiu pry ploskomu tortsevomu shlifuvanni z poperednim nakhylom osi shpyndelia / *V.H. Klymenko, I.M. Pyzhov* // Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni: zb. nauk. prats – Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. – № 1(26). – S. 69–80. **12.** *Krivoruchko D. V.* Modelirovanie protsessov rezaniia metodom konechnykh elementov: metodologicheskie osnovy (Monografiia) / *D. V. Krivoruchko, V. A. Zaloga* – Sумы: Universitetskaya kniga, 2012. – 496с. **13.** *Kundrák J.* Diamond grinding wheels production study with the use of the finite element method / *J. Kundrák, V. Fedorovich et al.* // Journal of Advanced Research. – 2016. – №6 (7). – P. 1057–1064. **14.** *Rodin P.R.* Osnovy formoobrazovaniia poverkhnosti rezaniem / *P.R. Rodin* – К: «Vishcha shkola», 1977. – 192 s. **15.** *Fedorenko, D.V.* Metodologii 3D modelirovaniia protsessov obrabotki trudnoobrabatyvaemykh materialov / *D.V. Fedorenko, V.A. Fedorovich i dr.* // Suchasni tekhnologii v mashinobuduvanni. – 2016. – №11. – S. 208–232. **16.** *Filimonov L.N.* Vysokoskorostnoe shlifovanie / *L.N. Filimonov* – L.: Mashinostroenie, 1979, 248 s.